

doi:10.3969/j.issn.1671-9492.2024.02.015

内蒙古某尾矿回收稀土试验及吸附动力学研究

王翔,赵增武,贾艳,贺宇龙,成昌华

(内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,包头 014000)

摘要:以内蒙古某尾矿为研究对象,对其进行了工艺矿物学研究。多元素分析结果表明原料中 REO 含量为 6.2%;矿物组成分析结果表明稀土矿物主要为氟碳铈和独居石,还含有少量的氟碳铈矿和黄河矿等,脉石矿物主要以铁矿物、萤石、辉石、闪石等为主;粒度筛析结果表明粒度在 $-25\text{ }\mu\text{m}$ 占比为 62.9%,稀土矿物粒度较细,会对浮选回收造成不利影响。进行吸附动力学研究,选择氟碳铈矿单矿物进行单矿物浮选试验探究 P_8 用量和 pH 值对矿物可浮性的影响,氟碳铈矿在 P_8 浮选体系中有较好的可浮性,且氟碳铈矿浮选的最佳 pH 值为 9。通过动力学方程对氟碳铈矿吸附 P_8 进行动力学拟合,结果表明 P_8 捕收能力强,适当用量可完全使氟碳铈矿上浮。以浮选为手段回收稀土矿物,在浮选试验中采用捕收性能和选择性都较好的羟肟酸类捕收剂 P_8 ,对脉石矿物辉石、闪石等矿物具有良好抑制效果的水玻璃作为抑制剂,FM-132 作为起泡剂,针对捕收剂用量、抑制剂用量、矿浆浓度、浮选温度以及浮选时间等进行条件试验确定最佳参数。经一粗两精闭路流程,可获得 REO 品位 51.85%、REO 回收率 79.12% 的稀土精矿,最佳参数为工业上对稀土的回收应用提供了技术支持,有利于实现稀土资源的高效利用。

关键词:尾矿;稀土;吸附动力学;浮选

中图分类号:TD923;TD954

文献标志码:A

文章编号:1671-9492(2024)02-0104-07

Rare Earth Recovery Experiment and Adsorption Kinetics of a Tailings in Inner Mongolia

WANG Xiang, ZHAO Zengwu, JIA Yan, HE Yulong, CHENG Changhua

(School of Mining and Coal College, Inner Mongolia University of Science & Technology,
Baotou 014000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Taking a tailings in Inner Mongolia as the research object, the process mineralogy was studied. The results of multi-element analysis showed that the REO content in the raw materials was 6.2%, and the results of mineral composition analysis showed that the rare earth minerals were mainly cerium fluorocarbon and monazite, and also contained a small amount of cerium fluorocarbonite and Yellow River minerals. The gangue minerals were mainly iron minerals, fluorite, pyroxene, amphibole, and so on. The results of particle size sieve analysis showed that the particle size was 62.9% passing $25\text{ }\mu\text{m}$, and the fine particle size of rare earth minerals would adversely affect the flotation recovery. The adsorption kinetics were studied, and the effects of P_8 dosage and pH value on the floatability of the minerals were investigated by the adsorption kinetics study, and the optimal pH value of the fluorocerite flotation was 9. The kinetic fitting of P_8 adsorption by the kinetic equation shows that P_8 has strong capture ability, and the appropriate dosage can completely float the basillite. In the flotation tests, the hydroxamic acid collector P_8 has good capture performance and selectivity, and the sodium silicate having good inhibitory effect on gangue minerals pyroxene and amphibole minerals were used as inhibitors. FM-132 was used as foaming agent. Laboratory experiments were carried out to determine the optimal flotation conditions such as collector dosage, inhibitor dosage, slurry concentration, flotation temperature and flotation time. Through a locked-cycle process of one roughing and two cleanings, a rare earth concentrate with a grade (REO) of 51.85% and a recovery of 79.12% can be obtained, which can effectively separate and recover the rare earth minerals in the tailings, and provide technical support for the recovery and application of rare earth in the industry, so as to realize the efficient utilization of rare earth resources.

Key words: tailings; rare earth; adsorption kinetics; flotation

收稿日期:2022-11-11

基金项目:国家重点专项项目(0901052102)

作者简介:王翔(1998—),男,山西临汾人,硕士研究生,主要从事矿物加工研究。

通信作者:赵增武(1972—),男,山东东营人,博士,教授,主要从事矿物加工研究。

稀土作为一种重要的合金化元素,被广泛应用于各个行业,如农业、医疗、机械、玻璃陶瓷以及机械制造和国防军事领域等,目前在我国乃至全世界已经成为了一种战略性资源^[1-4]。我国是稀土大国,稀土资源极为丰富,稀土储量为 4 400 万 t,约占全球稀土储量的 38%,位居世界第一^[5-6]。而内蒙古白云鄂博共伴生矿是多金属共生矿床,富含稀土、铌、铁和萤石,占我国稀土工业储量的 83.65%,居世界首位^[7-9]。随着我国经济的快速发展,矿产资源的开发利用量也在逐渐递增,伴随而来的是大量尾矿的产生,越来越多的尾矿被堆积在尾矿库中,作为珍贵的二次资源,对尾矿进行回收利用,不仅是对资源的充分利用,还能创造更多的经济利益价值^[10-12]。目前主要是两方面利用:一是经再选回收尾矿中的有用

组分,二是将剩余资源进行再利用^[13]。

本文以内蒙古某尾矿为研究对象,尾矿中稀土含量高,有很高的利用价值,但粒度较细,选别有一定难度。针对这种现状,需要确定一个合适的选别工艺,获取合格的稀土精矿产品,进而提高回收率,实现矿产资源的合理开发利用。

1 矿样性质

1.1 矿样化学多元素分析

对尾矿矿样进行了化学多元素分析,分析结果见表 1。由表 1 可知,矿样中稀土 REO 含量为 6.20%,脉石组分主要为 CaO、SiO₂、CaF₂,含量分别为 14.53%、12.28%、9.23%;还含有少量的 MgO、Na₂O、Al₂O₃ 等。

表 1 矿样化学多元素分析结果

Table 1 Results of chemical multi-element analysis of the ore sample /%

组分	TFe	CaO	MgO	SiO ₂	S	ThO ₂	CaF ₂	K ₂ O	Na ₂ O
含量	24.9	14.53	3.2	12.28	0.812	0.01	9.23	0.28	0.11
组分	REO	Nb ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	MnO ₂	BaO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	TiO ₂	mFe
含量	6.20	0.21	0.022 4	1.71	1.32	0.81	0.57	0.86	1.55

1.2 矿样矿物组成及相对含量

矿样矿物组成及相对含量分析结果见表 2。由表 2 可知,矿样中稀土矿物主要为氟碳铈矿和独居石,其中氟碳铈矿含量为 7.13%,独居石含量为 3.47%,矿样中还含有少量的氟碳钙铈矿和黄河矿。脉石矿物主要以铁矿物、萤石、含铁硅酸盐类以及碳

酸盐类矿物为主,其中铁矿物含量最高,为 33.49%;辉石、闪石、石英等硅酸盐类矿物含量为 19.06%;白云石、方解石等碳酸盐类矿物含量为 11.13%;萤石含量为 13%;其中,白云石、方解石、萤石等矿物易浮,会对后续稀土浮选造成不利影响。

表 2 矿样矿物组成及相对含量

Table 2 Mineral composition and relative content of the ore sample /%

矿物名称	含量	矿物名称	含量
氟碳铈矿	7.13	长石	0.38
氟碳钙铈矿	0.76	闪石	2.89
黄河矿	0.44	辉石	13.78
独居石	3.47	磷灰石	2.01
磁铁矿/赤铁矿	33.49	白云石	9.94
铌矿物	0.48	方解石	1.19
萤石	13	重晶石	2.63
云母	1.08	其他矿物	4.94
石英	2.39		

1.3 矿样粒度组成分析

对矿样进行粒度筛析,筛析结果见表 3。由表 3 可知,60%以上的稀土分布在一 25 μm 粒级,这表明

矿样中稀土矿物粒度较细,会给后续稀土浮选造成一定困难,影响稀土矿物的有效回收。

表 3 矿样粒度筛析结果

Table 3 Result of sieving analysis tests of the ore sample /%

粒度/μm	产率	筛上累计产率	筛下累计产率	REO	分布率
+74	5.40	5.40	100.0	5.20	4.53
-74+43	26.50	31.90	94.60	5.66	24.19
-43+38	0.80	32.70	68.10	7.20	0.93
-38+25	4.40	37.10	67.30	7.50	5.32
-25	62.90	100.0	62.90	6.41	65.03
合计	100.0			6.20	100.0

2 氟碳铈矿吸附 P_8 动力学分析

试验选用矿物主要为氟碳铈矿和独居石,为便于研究,选择氟碳铈矿单矿物进行机理研究,独居石浮选机理与氟碳铈矿类似。通过单矿物浮选试验,结合羟肟酸类捕收剂 P_8 在氟碳铈矿表面的吸附动力学计算,探究 P_8 对氟碳铈矿的吸附行为。

2.1 单矿物浮选试验

单矿物浮选试验在 XFGCII-35 型实验室用充气挂槽浮选机中进行,叶轮转速 1 992 r/min,每次称取 2.0 g 试验矿样加到 40 mL 浮选槽中,加 30 mL 去离子水调浆,按照顺序加入一定浓度浮选药剂,分别搅拌调浆 3 min,测量浮选前 pH 作为试验 pH 值,然后浮选刮泡 4 min,浮选温度为 60 ℃。对泡沫产品和槽内产品分别过滤,干燥称重,计算浮选回收率。

2.1.1 P_8 用量对氟碳铈矿可浮性的影响

采用氢氧化钠调节 pH=9,不加抑制剂时氟碳铈矿的回收率与 P_8 用量的关系见图 1。由图 1 可知,随着 P_8 用量的增加,氟碳铈矿的回收率逐渐增加,当 P_8 用量达到 26.2 mg/L 时,其回收率达到最大值,为 94.8%。由此可见,氟碳铈矿在 P_8 浮选体系中有较好的可浮性。

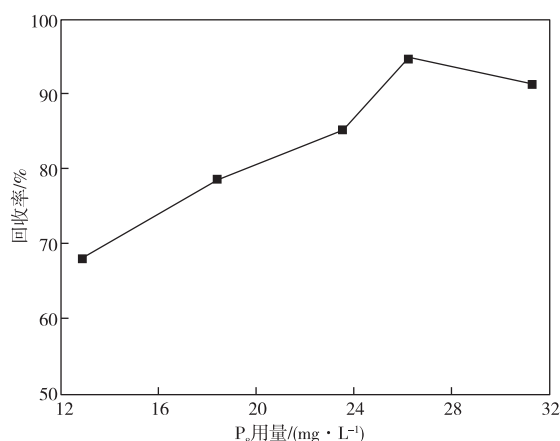


图 1 P_8 用量对氟碳铈矿可浮性的影响

Fig. 1 Effect of P_8 dosage on the floatability of bastnaesite

2.1.2 pH 值对氟碳铈矿可浮性的影响

当 P_8 浓度为 26.2 mg/L、温度为 60 ℃ 时, pH 值对氟碳铈矿可浮性的影响见图 2。由图 2 可知,当矿浆 pH 值小于 9 时,随着 pH 值的升高,氟碳铈矿的回收率增大;当 pH=9 时,氟碳铈矿的回收率达到最大;当矿浆 pH 值大于 9 时,氟碳铈矿的浮选回收率开始减小。因此,确定氟碳铈矿浮选的最佳 pH 值为 9。

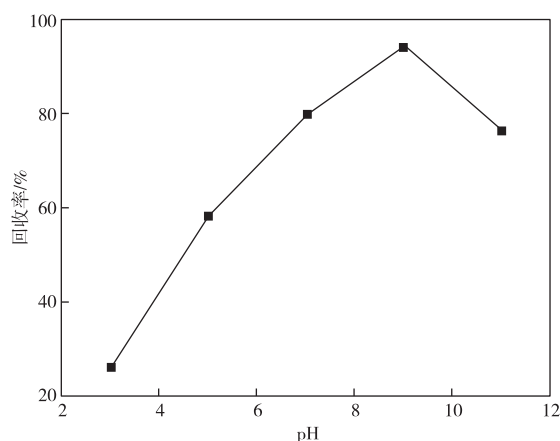


图 2 pH 值对氟碳铈矿可浮性的影响

Fig. 2 Effect of pH value on the floatability of bastnaesite

2.2 吸附动力学试验

2.2.1 pH 值对氟碳铈矿吸附 P_8 的影响

固定 P_8 浓度为 26.2 mg/L、温度为 60 ℃、吸附时间为 15 min 时, pH 值对氟碳铈矿吸附 P_8 的影响见图 3。由图 3 可知,当 pH 小于 9 时,随着 pH 值的升高, P_8 在氟碳铈矿表面吸附量增大;当 pH 大于 9 时,随着 pH 值的升高, P_8 在氟碳铈矿表面吸附量减小。结果表明,当 pH=9 时, P_8 在氟碳铈矿表面吸附量最大,这与 pH 单矿物浮选试验结果相一致。

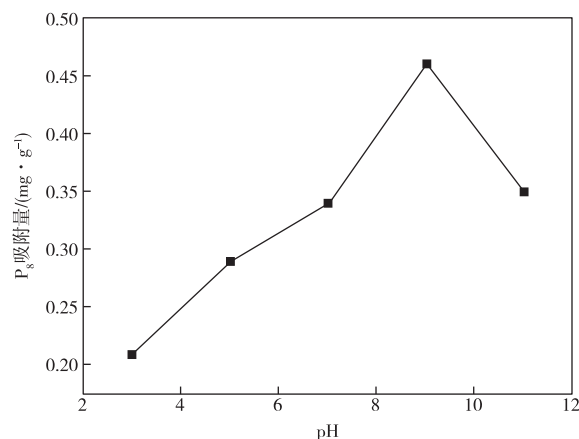


图 3 pH 值对氟碳铈矿吸附 P_8 的影响

Fig. 3 Effect of pH value on the adsorption of P_8 by bastnaesite

2.2.2 吸附时间对氟碳铈矿吸附 P_8 的影响

固定 P_8 浓度为 26.2 mg/L、温度为 60 ℃,考察 pH 值为 3、6、9 时吸附时间对氟碳铈矿吸附 P_8 的影响,结果见图 4。由图 4 可知,随着吸附时间的增加,吸附量逐渐增加,当吸附时间为 10 min 时趋于平稳。

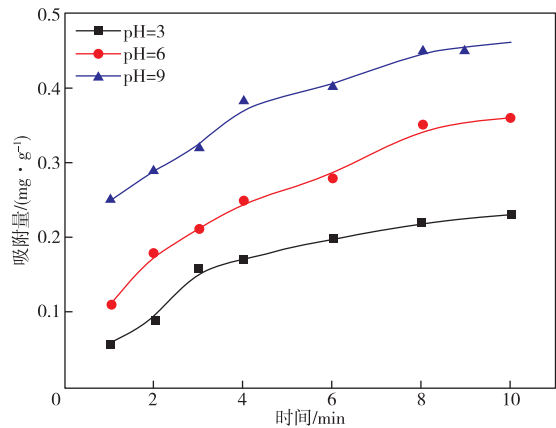
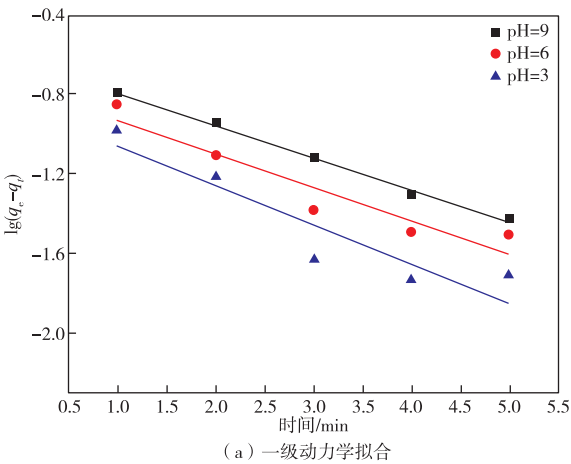


图 4 吸附时间对氟碳铈矿吸附 P₈ 的影响

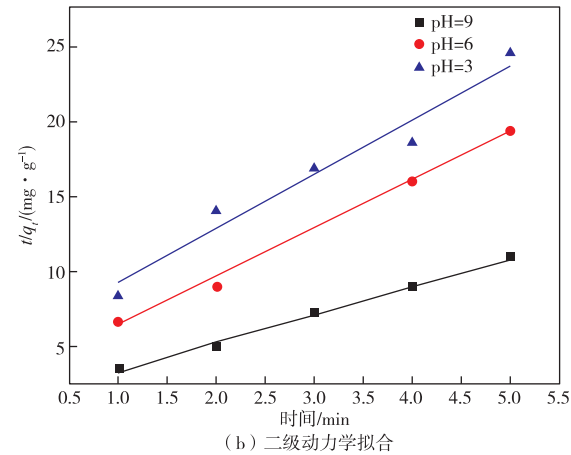
Fig. 4 Effect of adsorption time on adsorption of P₈ by bastnaesit

2. 2. 3 吸附动力学拟合

图 5 所示为固定 P₈ 浓度为 26.2 mg/L、温度为 60 ℃, pH 值为 3、6、9 时,对氟碳铈矿吸附 P₈ 进行动力学拟合,拟合结果见图 5,拟合参数见表 4。由表 4 可知,二级动力学模型拟合相对一级动力学模型,拟合指数 $R_{22} > R_{12}$,拟合结果与试验值更为接近。pH=9 时的二级动力学拟合吸附速率常数为最大值说明 pH=9 时,P₈ 在氟碳铈矿吸附更快。



(a) 一级动力学拟合



(b) 二级动力学拟合

图 5 氟碳铈矿吸附 P₈ 的动力学拟合曲线
Fig. 5 Kinetic fitting curve of P₈ adsorption on bastnaesite

表 4 氟碳铈矿吸附 P₈ 的动力学拟合参数

Table 4 Kinetic fitting parameters of P₈ adsorption on bastnaesite

pH 值	一级动力学			二级动力学		
	$q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	K_1 / min^{-1}	R_{12}	$q_e / (\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	$K_2 / (\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1})$	R_{22}
3	0.139	0.374	0.855 9	0.273	1.34	0.964 5
6	0.173	0.386	0.895 8	0.312	1.86	0.973 6
9	0.236	0.457	0.994 8	0.535	2.31	0.996 4

3 实际矿物浮选试验

根据工艺矿物学分析结果,矿样中的辉石、闪石、石英等脉石矿物含量高,水玻璃对于该类矿物具有良好的抑制效果,因此选用水玻璃为抑制剂,P₈ 作为捕收剂,FM-132 作为起泡剂。P₈ 对稀土的捕收性能强,选择性好。

3. 1 抑制剂用量试验

固定捕收剂用量为 0.889 kg/t,起泡剂用量

0.044 kg/t,浮选时间 210 s,矿浆浓度 60%,浮选温度 60 ℃,进行抑制剂水玻璃用量试验,试验结果见图 6。由图 6 可知,随着水玻璃用量的增加,稀土精矿 REO 品位、回收率均呈现升高趋势,当水玻璃用量为 0.889 kg/t 时,REO 品位、回收率均达到最高点,继续增加水玻璃用量,REO 品位及回收率略有降低并趋于稳定。综合考虑稀土 REO 品位与回收率,确定抑制剂水玻璃最佳用量为 0.889 kg/t。

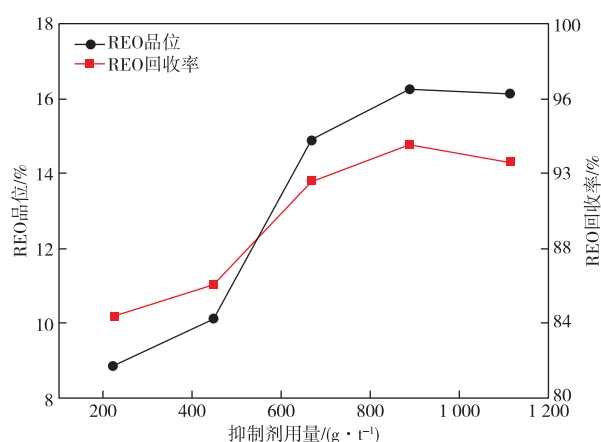


图6 抑制剂用量试验结果

Fig. 6 Results of depressant dosage tests

3.2 捕收剂用量试验

固定水玻璃用量为 0.889 kg/t, 起泡剂用量 0.044 kg/t, 矿浆浓度 60%, 浮选时间 210 s, 浮选温度 60 ℃, 进行捕收剂用量试验, 试验结果见图 7。由图 7 可知, 随着捕收剂用量增加, 稀土精矿 REO 品位、回收率逐渐增加, 当捕收剂用量为 1.11 kg/t 时 REO 品位和回收率达到最高点, 继续增加捕收剂用量, REO 品位、回收率降低。综合考虑, 捕收剂合适用量为 1.11 kg/t。

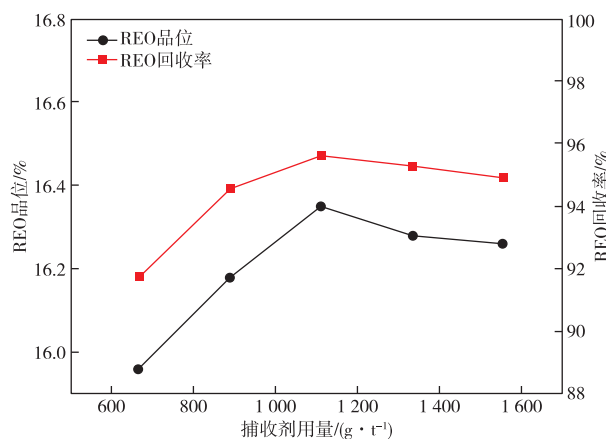


图7 捕收剂用量试验结果

Fig. 7 Results of collector dosage tests

3.3 矿浆浓度试验

固定水玻璃用量为 0.889 kg/t, 捕收剂用量为 1.11 kg/t, 起泡剂用量 0.044 kg/t, 浮选时间 210 s, 浮选温度 60 ℃, 进行矿浆浓度试验, 试验结果见图 8。由图 8 可知, 随着矿浆浓度升高, 稀土精矿 REO 品位逐渐下降, 回收率总体呈现上升趋势; 当矿浆浓度为 60% 时, 稀土精矿 REO 回收率处于一个较高值, 当矿浆浓度继续升高时, REO 品位下降、回收率趋于稳定。综合考虑, 确定 60% 为适宜浮选的最佳矿浆浓度。

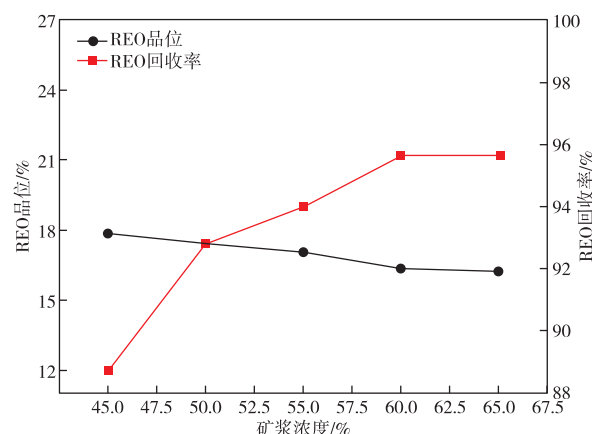


图8 矿浆浓度试验结果

Fig. 8 Results of slurry concentration tests

3.4 浮选温度试验

固定水玻璃用量为 0.889 kg/t, 捕收剂用量为 1.11 kg/t, 起泡剂用量 0.044 kg/t, 浮选时间 210 s, 矿浆浓度 60%, 进行浮选温度试验, 试验结果见图 9。由图 9 可知, 随着浮选温度的增加, 稀土精矿 REO 品位、回收率逐渐上升, 这说明温度的升高可以改善药剂的性能, 使药剂充分反应, 但受限于实验室条件, 室温较低, 最高温度只能达到 60 ℃; 当浮选温度达到 60 ℃ 时 REO 品位、回收率均达到最高点。因此, 选择 60 ℃ 作为最佳的浮选温度条件。

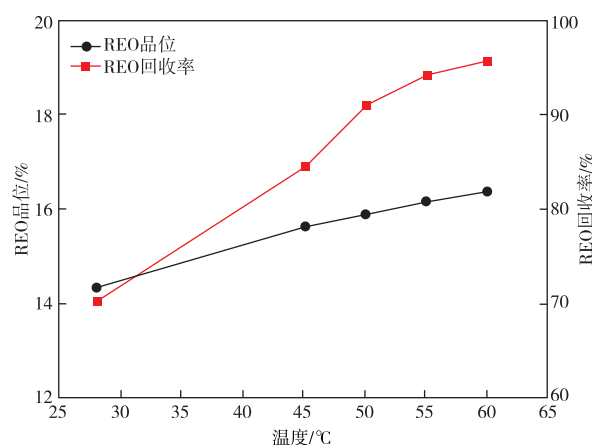


图9 浮选温度试验结果

Fig. 9 Results of flotation temperature tests

3.5 浮选时间试验

固定水玻璃用量为 0.889 kg/t, 捕收剂用量为 1.11 kg/t, 起泡剂 0.044 kg/t, 浮选温度 60 ℃, 矿浆浓度 60%, 进行浮选时间试验, 试验结果见图 10。由图 10 可知, 随着浮选时间的增加, 稀土精矿 REO 回收率逐渐上升后趋于稳定, 但品位逐渐下降; 当浮选时间为 210 s 时 REO 回收率达到最高, 品位也相对较高, 继续增加浮选时间, REO 回收率趋于稳定, 品位仍有下降后趋于稳定。综合考虑, 确定 210 s 为最佳浮选时间。

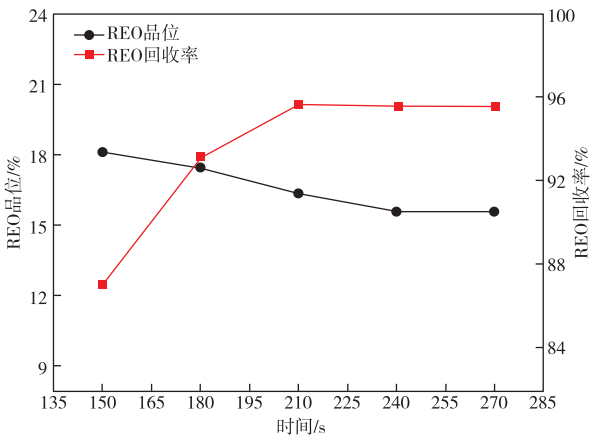


图 10 浮选时间试验结果

Fig. 10 Results of flotation time tests

3.6 开路试验

固定水玻璃用量为 0.889 kg/t, P_8 用量为 1.11 kg/t, 起泡剂用量 0.044 kg/t, 浮选温度 60 ℃, 矿浆浓度 60%, 浮选时间 210 s, 进行一粗两精的开路试验, 试验流程见图 11, 试验结果见表 5。由表 5 可知, 通过一次粗选、两次精选的开路试验流程, 可以获得稀土精矿 REO 品位 52.08%、回收率为 34.33% 的选别指标。

表 5 开路试验结果

Table 5 Results of open-circuit tests /%

产品名称	产率	REO 品位	REO 回收率
尾矿	62.51	0.44	4.40
中矿 1	1.40	5.28	18.18
中矿 2	11.99	22.38	43.09
精矿	4.10	52.08	34.33
原矿	100.0	6.22	100.0

3.7 闭路试验

为了进一步提高浮选回收率, 在条件试验与开路试验的基础上进行浮选闭路试验, 试验流程见图 12, 试验结果见表 6。由表 6 可知, 闭路试验最终可以得到的稀土精矿 REO 品位为 51.85%、回收率为 79.12% 的浮选指标。对最终稀土精矿产品进行多元素分析, 结果见表 7。由表 7 可知, 稀土精矿中脉石物质主要为 CaO 和 F, 含量分别为

6.28% 为 8.51%; 若后续仍需提高稀土品位, 需考虑对碳酸盐矿物以及萤石进行抑制, 从而达到更好的选别效果。

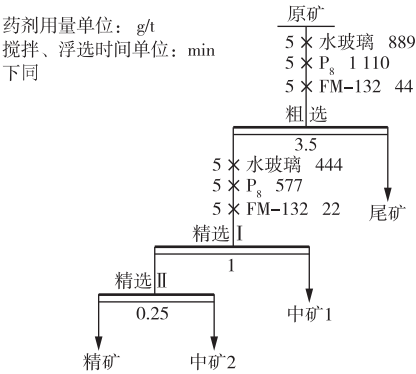


图 11 开路试验流程

Fig. 11 Flowsheet of open-circuit tests

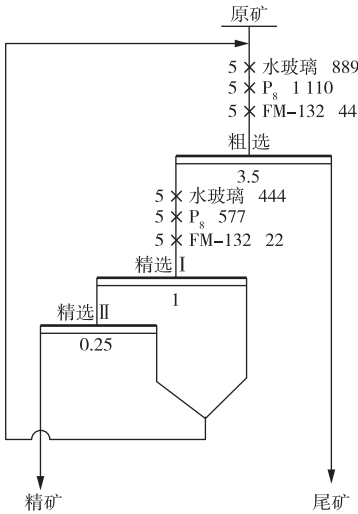


图 12 闭路试验流程

Fig. 12 Flowsheet of the locked-cycle tests

表 6 闭路试验结果

Table 6 Results of the locked-cycle tests /%

产品名称	产率	REO 品位	REO 回收率
精矿	9.46	51.85	79.12
尾矿	90.54	1.43	20.88
中矿	30.72	11.2	55.49
原矿	100.0	6.20	100.0

表 7 稀土精矿多元素分析结果

Table 7 Results of multi-element analysis of the rare earth concentrates /%

组分	REO	CaO	MgO	SiO ₂	S	ThO ₂	F	K ₂ O	Na ₂ O
含量	51.85	6.28	0.42	2.24	0.183	0.04	8.51	0.026	0.22
组分	TFe	Nb ₂ O ₅	Sc ₂ O ₃	MnO ₂	BaO	P ₂ O ₅	Al ₂ O ₃	TiO ₂	mFe
含量	7.61	0.19	0.0103	0.36	0.77	2.02	0.087	0.17	0.2

4 结论

1) 矿样中 REO 含量为 6.2%, 主要稀土矿物为

氟碳铈矿物 (含量 7.13%) 和独居石矿物 (含量 3.47%), 还有少量的氟碳钙铈矿与黄河矿等, 且稀土矿物粒度较细, 有一定的选别难度; 脉石矿物主要

有铁矿物、萤石、含铁硅酸盐类矿物以及碳酸盐类矿物等。

2)单矿物浮选试验和吸附动力学计算结果表明, P_8 浮选氟碳铈矿的最佳 pH 值为 9,在适当用量的 P_8 条件下可完全使氟碳铈矿上浮, P_8 对氟碳铈矿的捕收能力较强。

3)在水玻璃用量 0.889 kg/t、 P_8 用量 1.11 kg/t、起泡剂用量 0.044 kg/t 的药剂条件下,矿样经一粗两精的浮选闭路试验流程,可获得 REO 品位为 51.85%、回收率为 79.12% 的稀土精矿,试验结果为工业应用提供了技术支持。

参考文献

- [1] 张景怀,唐定襄,张洪杰,等. 稀土元素在镁合金中的作用及其应用[J]. 稀有金属,2008,32(5):659-667.
ZHANG Jinghuai, TANG Dingxiang, ZHANG Hongjie, et al. Effect and application of rare earth elements in magnesium alloys[J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2008,32(5):659-667.
- [2] 张苏江,张立伟,张彦文,等. 国内外稀土矿产资源及其分布概述[J]. 无机盐工业,2020,52(1):9-16.
ZHANG Sujang, ZHANG Liwei, ZHANG Yanwen, et al. Summarize on rare earth mineral resources and their distribution at home and abroad[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020,52(1):9-16.
- [3] 时晗,何晓娟,胡真,等. 我国稀土矿选矿近十年研究现状及发展前景[J]. 有色金属(选矿部分),2021(4):18-25.
SHI Han, HE Xiaojuan, HU Zhen, et al. Research status and development prospect of rare earth ore dressing in China in recent ten years[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2021(4):18-25.
- [4] 喻福涛,余新文,商容生,等. 四川典型稀土矿高效回收稀土试验研究[J]. 有色金属(选矿部分),2020(4):22-27.
YU Futao, YU Xinwen, SHANG Rongsheng, et al. Experimental study on efficient recovery of rare earth from typical rare earth ore in Sichuan[J]. Nonferrous Metals(Mineral Processing Section), 2020(4):22-27.
- [5] 谢东岳,伏彩萍,唐忠阳,等. 我国稀土资源现状与冶炼技术进展[J]. 矿产保护与利用,2021,41(1):152-160.
XIE Dongyue, FU Caiping, TANG Zhongyang, et al. Current status of rare earth resources in China and progress of extracting technology[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2021,41(1):152-160.
- [6] 朱智慧,杨占峰,王其伟,等. 白云鄂博稀土精矿工艺矿物学研究[J]. 有色金属(选矿部分),2019(6):1-4,22.
ZHU Zhihui, YANG Zhanfeng, WANG Qiwei, et al. Study on technological mineralogy of rare earth concentrate in Bayan Obo [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(6):1-4,22.
- [7] 程建忠,侯运炳,车丽萍. 白云鄂博矿床稀土资源的合理开发及综合利用[J]. 稀土,2007,34(1):70-74.
CHENG Jianzhong, HOU Yunbing, CHE Liping. Making rational multipurpose use of resources of Re in Baiyunebo deposit [J]. Chinese Rare Earths, 2007, 34(1):70-74.
- [8] 王维维,李二斗,王其伟,等. 白云鄂博微细粒稀土矿工艺矿物学及浮选试验研究[J]. 矿产综合利用,2021(5):81-85.
WANG Weiwei, LI Erdou, WANG Qiwei, et al. Study on process mineralogy and flotation test of the Bayan Obo fine-grained rare earth ore [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):81-85.
- [9] 刘雁江,侯少春,魏威,等. 白云鄂博东矿白云石型铌稀土铁矿石中铌元素赋存状态研究[J]. 有色金属(选矿部分),2022(5):16-23.
LIU Yanjiang, HOU Shaochun, WEI Wei, et al. Occurrence state of niobium in dolomite type niobium rare earth iron ore in Bayan Obo east orebody [J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2022(5):16-23.
- [10] 刘志强,郝梓国,刘恋,等. 我国尾矿综合利用研究现状及建议[J]. 地质论评,2016,62(5):1277-1282.
LIU Zhiqiang, HAO Ziguo, LIU Lian, et al. Status of the comprehensive utilization of tailings in China and suggestions [J]. Geological Review, 2016, 62 (5): 1277-1282.
- [11] 刘恋,郝情情,郝梓国,等. 中国金属尾矿资源综合利用现状研究[J]. 地质与勘探,2013,49(3):437-443.
LIU Lian, HAO Qingqing, HAO Xinguo, et al. Current status of the comprehensive utilization of metallic mine tailings in China [J]. Geology and Exploration, 2013, 49(3):437-443.
- [12] 赖才书,胡显智,字富庭. 我国矿山尾矿资源综合利用现状及对策[J]. 矿产综合利用,2011(4):11-14.
LAI Caishu, HU Xianzhi, ZI Futing. Comprehensive utilization status and countermeasure of mine tailing [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2011(4): 11-14.
- [13] 蔚美娇,孔祥云,黄劲松,等. 我国尾矿固废处置现状及建议[J]. 化工矿物与加工,2022,51(1):34-38.
YU Meijiao, KONG Xiangyun, HUANG Jinsong, et al. Status of disposal of tailings as a solid waste and suggestions in China [J]. Industrial Minerals & Processing, 2022,51(1):34-38.

(本文编辑 刘水红)